

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-115690

(43)Date of publication of application : 06.05.1998

(51)Int.Cl.

G21C 3/328

G21C 3/328

G21C 3/326

(21)Application number : 09-299862

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 31.10.1997

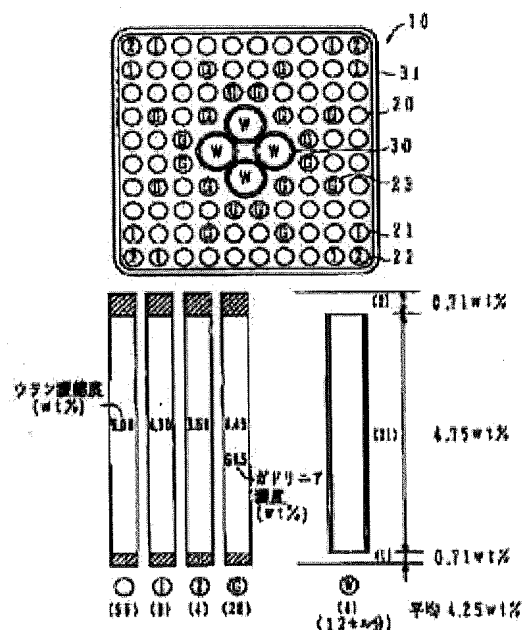
(72)Inventor : AOYAMA TADAO  
BESSHO TAISUKE  
YAMASHITA JUNICHI  
HAIKAWA KATSUMASA  
UMEHARA HAJIME  
YOKOMIZO OSAMU  
SONEDA HIDEO  
NAKAMURA MITSUYA

## (54) FUEL ASSEMBLY

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To raise average uranium enrichment and raise average take-out burnup to 45GWd/t without arranging fuel rods with gadolinia (Gd rods) in the outermost of fuel assemblies in the case a restriction of maximum uranium enrichment of 5.0wt.% is given to fuel assemblies for a boiling, water reactor.

**SOLUTION:** The average uranium enrichment of fuel rods 20 to 23 is made 4wt.% or more, the number fraction of Gd rods to the whole fuel rods is made 20 to 30%. The enrichment of them is made in between the pellet minimum uranium enrichment and the pellet maximum uranium enrichment and to be 0.84 to 0.96 of the maximum uranium enrichment. The average uranium enrichment in the fuel assembly cross section in enriched fuel part excluding the blanket region at the upper and lower ends is made 4.5wt.% and more or 4.3wt.% and more. Or the ratio of the average uranium enrichment in the fuel assembly cross section in the particular fuel part and the fuel pellet maximum uranium enrichment is made 1.11 or less or 1.16 or less.





【特許請求の範囲】

【請求項1】燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、

(a) 前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；

(b) 前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；

(c) 前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が4.5wt%以上であることを特徴とする燃料集合体。

【請求項2】燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、

(a) 前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；

(b) 前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；

(c) 前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度と前記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比が1.11以下であることを特徴とする燃料集合体。

【請求項3】燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、

(a) 前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料

集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；

(b) 前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；

(c) 前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が4.3wt%以上であることを特徴とする燃料集合体。

【請求項4】燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、

(a) 前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；

(b) 前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；

(c) 前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度と前記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比が1.16以下であることを特徴とする燃料集合体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は沸騰水型原子炉(BWR)用燃料集合体に係わり、特に、適用できるウラン最高濃縮度に制約があるときに、高燃焼度化によって燃料経済性向上を達成するのに好適な燃料集合体に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、軽水型原子炉では燃料経済性向上と廃棄物量低減(燃料体取出数低減)が重要な課題となっている。この燃料経済性向上と燃料体取出数低減には、燃料集合体の取出燃焼度を大きくすること(高燃焼度化)が効果的である。

【0003】燃料集合体の取出燃焼度を大きくするためには、炉心に装荷する新燃料集合体ウランペレットのウラン-235割合を大きくする、すなわち新燃料集合体平均のウラン濃縮度を高めること(高濃縮度化)が必要

である。高燃焼度化のためウラン濃縮度を高めることに  
関する従来技術として以下のものがある。

【0004】 特開昭63-133086号公報

この従来技術では、高濃縮度化の中で最高濃縮度を低く  
することなどを目的として、ガドリニア入り燃料棒を燃  
料集合体の最外周及びウォータロッド周囲の一部に配置  
することで、燃料棒の濃縮度の種類を2種類または3種  
類に減らし、最高濃縮度の燃料棒本数を増やすことによ  
って最高濃縮度の値を低くしている。具体的には、その  
公報の第1図の実施例では、燃料棒の濃縮度を7.2wt%と5.4wt%の2種類とし、ガドリニア入り燃料  
棒のウラン濃縮度を最低の5.4wt%とし、かつその  
ガドリニア入り燃料棒を燃料集合体の最外周とウォータ  
ロッドの周囲に配置している。また、第10図の実施例  
では、燃料棒の濃縮度を6.6wt%と6.2wt%と  
5.2wt%の3種類とし、ガドリニア入り燃料棒のウ  
ラン濃縮度を最高の6.6wt%とし、かつそのガドリ  
ニア入り燃料棒を燃料集合体の最外周とウォータロッド  
の周囲に配置している。

【0005】 特開昭64-28587号公報

この従来技術では、燃料集合体の平均濃縮度を高めるた  
め、ガドリニア入り燃料棒のウラン濃縮度を燃料集合体  
で使用されているウランの中で最高濃縮度とし、かつガ  
ドリニア入り燃料棒の燃料有効長を短くして、ウラン濃  
縮度を最高としたために生じる出力上昇による内圧の上  
昇を抑制している。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】 上記のように、高燃焼  
度化のためには燃料集合体のウラン濃縮度を高めなけれ  
ばならないが、ウラン濃縮度を高めるためには種々の観  
点からの検討が必要である。

【0007】 例えば、高燃焼度化するためウラン濃縮度  
を高くすると、燃料集合体内の出力ピーキング、つまり  
ローカルピーキング係数が大きくなる。特に、燃料集合  
体の最外層、特にそのコーナー領域付近のローカルピー  
キング係数が大きくなる。このため、例えば比較的中性  
子減速が起こりやすく、同じウラン濃縮度としても出力  
が大きくなりやすい燃料集合体の最外層、特にそのコー  
ナー領域付近の燃料棒の濃縮度を低くするなど、燃料集  
合体のウラン濃縮度の分布をコントロールしてローカル  
ピーキング係数が一定の値以下になるようにしている。

【0008】 また、減速材対燃料比を大きくしないで濃  
縮度を上げたのでは、中性子のエネルギーが硬化してしま  
い、燃料集合体の無限増倍率はその濃縮度における無限  
増倍率の最大値とはならず、またボイド反応度係数の絶対  
値が大きくなり過ぎて過渡時の炉心の応答が厳しくなる。  
このため、ウォータロッドの水領域を増やす必要がある。  
一方、ウォータロッドの水領域増加させていくと、8×8  
格子のままでは燃料棒本数が減少し、熱的余裕が小さく  
なる。このため、燃料棒配列を9

行×9列の格子とすることにより、ウォータロッド配置  
の自由度を増すと共に、燃料棒の平均線出力密度を低減  
させることによって熱的余裕を確保することが考えられて  
いる。

【0009】 また、サイクル初期の余剰反応度を押さえる  
ため、可燃性吸収材例えばガドリニアを添加した燃料棒  
(ガドリニア入り燃料棒) が用いられるが、高燃焼度化  
のためウラン濃縮度を増すと、ガドリニアによって抑制  
しなければならない反応度量が増加し、かつその期間が  
伸びるので、ガドリニア入り燃料棒の本数も増やす必要  
がある。このガドリニア入り燃料棒は燃料集合体の最外  
周に配置すると、反応度を制御する制御棒の近くに同じ  
吸収材が位置することになって制御棒のきき(制御棒価  
値)が悪くなるので、通常、ガドリニア入り燃料棒は最  
外周より内側に配置される。また、ガドリニア入り燃料  
棒は、ウランのみの燃料棒に比べ燃料棒の熱伝導度が  
数%悪くなる。このため、たとえ出力が同じ場合でも燃  
料棒中心温度が高くなり燃料健全性を損なう方向にある  
ので、ウラン濃縮度を低くしている。

【0010】 以上の技術背景の下、上記の特開昭63-  
133086号公報及び特開昭64-28587号公報に記載の従  
来技術が提案されている。しかし、これら従来技術には  
以下の問題点がある。

【0011】 上記のように、現在の燃料ペレットの製造  
技術では、燃料集合体に適用できる最高ウラン濃縮度  
に5.0wt%という制約がある。特開昭64-28587号公報  
に記載の従来技術は、最高濃縮度として7.2wt% (第1  
図の実施例)、6.6wt% (第10図の実施例) を挙げて  
おり、当該制約下で平均濃縮度を高めることを考えてい  
ない。また、第1図及び第10図の実施例では、ウラン  
の高濃縮度化に対応してガドリニア入り燃料棒の本数を  
増しており、この場合ガドリニア入り燃料棒の一部は必  
ず燃料集合体の最外周に配置することを条件としている。  
しかし、このようにガドリニア入り燃料棒を燃料集合体  
の最外周に配置することは、上述したように制御棒価値  
を低下させ、炉停止性能が損なわれる。したがって、で  
きればガドリニア入り燃料棒を燃料集合体の最外周に配  
置することなく、平均濃縮度を高めることが望まれる。

【0012】 特開昭64-28587号公報に記載の従  
来技術は、最高ウラン濃縮度に5.0wt%という制約が  
課せられた場合に高燃焼度化を図る手段を提供してい  
る。しかし、この従来技術では、ガドリニア入り燃料棒  
のウラン濃縮度を最高濃縮度とするため、その燃料有効  
長を短くするという犠牲を払っており、今までの仕様の  
燃料棒が使用できなくなるなどの設計上の不都合が生じ  
る上、燃料装荷量が減少する問題があった。また、熱伝  
導度が悪いガドリニア入り燃料棒の中心温度の上昇は防  
止できないので、線出力密度などの熱的制限値をクリア  
できなくなる。

【0013】本発明の目的は、最高ウラン濃縮度に5.0wt%という制約が課せられた場合に、可燃性吸収材を添加した燃料棒に問題を生じることなく平均ウラン濃縮度を高め、45GWd/tの取出平均燃焼度よりも高燃焼度化をめざした沸騰水型原子炉用の燃料集合体を提供することである。

【0014】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明は、燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、(a)前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；(b)前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；(c)前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が4.5wt%以上であるものとする。

【0015】また、上記目的を達成するために、本発明は、燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、(a)前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；(b)前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；(c)前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度と前記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比が1.1以下であるものとする。

【0016】更に、上記目的を達成するために、本発明は、燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多

数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、(a)前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；(b)前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；(c)前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が4.3wt%以上であるものとする。

【0017】また、上記目的を達成するために、本発明は、燃料ペレットが充填され正方格子状に配列された多数の燃料棒と、少なくとも1本の中性子減速棒とを有し、前記多数の燃料棒に充填されている燃料ペレットの最高ウラン濃縮度が5wt%以下であり、かつ前記多数の燃料棒は可燃性吸収材を含まない複数の第1の燃料棒と、可燃性吸収材を含む複数の第2の燃料棒とを有している燃料集合体において、(a)前記正方格子状に配列された全ての燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度は4wt%以上であり；(b)前記全ての燃料棒に対する第2の燃料棒の本数割合は20%～30%であり、かつ前記第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度は前記全ての燃料棒における燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ前記最高ウラン濃縮度の0.84～0.96であり；(c)前記正方格子状に配列された燃料棒は、上下端部にその他の領域より燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度が低い領域を有し、この上下端部を除いた領域における燃料集合体の一横断面での平均ウラン濃縮度と前記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比が1.16以下であるものとする。

【0018】以上のように構成した本発明において、多数の燃料棒（全燃料棒）の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度（以下、適宜「燃料集合体の平均ウラン濃縮度」という）を4wt%以上とすることにより、燃料集合体の取出平均燃焼度は45GWd/tよりも高燃焼度化できる。

【0019】可燃性吸収材を含む第2の燃料棒の全燃料棒に対する本数割合を20%～30%とすることにより、燃料集合体の平均ウラン濃縮度の増大に対して余剰反応度が適切に制御される。第2の燃料棒の濃縮度に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度（以下、適宜

「ペレットウラン濃縮度」という)を燃料ペレットの最高ウラン濃縮度と最低ウラン濃縮度の間であって、かつ第2の燃料棒に充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度を前記最高ウラン濃縮度の0.84~0.96にすることにより、熱伝導度が悪い可燃性吸収材を含む第2の燃料棒の中心温度をその他の可燃性吸収材を含まない第1の燃料棒の中心温度と同等とし、かつ平均ウラン濃縮度の4wt%以上の増大に寄与する。

【0020】燃料棒の上下端部にその他の領域より燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度が低い領域、例えば天然ウランブランケットを設けることにより、中性子の洩れを少なくし効率良く燃料を燃やし、一層の高燃焼度化が図れる。

【0021】燃料棒の上下端部に平均ウラン濃縮度が低い領域を設けると、その他の領域での燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度は4.5wt%以上又は4.3wt%以上にするか、その他の領域での燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度と上記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比を1.11以下又は1.16以下にすることにより、燃料集合体の平均濃縮度を4wt%以上にできる。

【0022】即ち、天然ウランブランケットを上端部に2/24ノード、下端に1/24ノード設けた場合、その他の領域での燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度と上記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比を1.11以下にすれば燃料集合体の平均濃縮度が4wt%以上にできる。このとき当該その他の領域での燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度は4.5wt%以上となる。一方、天然ウランブランケットを上下端部に1/24ノードずつ設けた場合、その他の領域での燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度と上記燃料ペレットの最高ウラン濃縮度の比を1.16以下にすれば燃料集合体の平均濃縮度を4wt%以上になる。このとき当該その他の領域での燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度は4.3wt%以上となる。

#### 【0023】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施例を図面を用いて詳細に説明する。まず、本発明の第1の実施例を図1~図9により説明する。本実施例は、燃料棒配列が10行10列の燃料集合体10において燃料ペレットの最高ウラン濃縮度を5.0wt%とした場合のものである。

【0024】図1において、本実施例の燃料集合体10は、複数の燃料棒20、21、22、23と、4本の太径ウォータロッド30とを有し、これら燃料棒20~23及びウォータロッド30はチャンネルボックス31内に配置されている。これら燃料棒のうち、燃料棒21、22は燃料集合体10の4つのコーナー領域にある燃料棒であり、燃料棒23は可燃性吸収材、即ちガドリニアを含む燃料棒(以下、「Gd棒」という)であり、燃料棒20はそれ以外の燃料棒である。これら燃料棒20~23は、燃料有効部の2/24ノードの上端部と1/2

4ノードの下端部を除いた21/24ノードの領域に一樣なウラン濃縮度の燃料ペレットが充填され、2/24ノードの上端部と1/24ノードの下端部に天然ウランを燃料とするブランケットが形成されている。

【0025】燃料棒20は56本あり、そこに充填されている燃料ペレットのウラン濃縮度(以下、適宜「ペレットウラン濃縮度」という)は5.0wt%、即ち最高ウラン濃縮度であり、4つのコーナー領域に位置する4本の燃料棒22のペレットウラン濃縮度は3.6wt%であり、燃料棒22に隣接する8本の燃料棒21のペレットウラン濃縮度は4.30wt%である。また、Gd棒23は20本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.45wt%である。Gd棒23はそのうちの1/2以上の12本がウォータロッド30に面して配置されている。また、Gd棒23は制御棒の正方形格子状の配列の最外周を除いた領域に配置されている。上下端部のブランケット領域における天然ウランの濃縮度は0.71wt%である。

【0026】燃料棒20、21、22、23の総本数は88本であり、Gd棒の全燃料棒に対する本数割合は20/88=23%である。Gd棒23のペレットウラン濃縮度の4.45wt%は、ペレット最高濃縮度の5.0wt%とペレット最低濃縮度の3.6wt%間にある。Gd棒23を除いた燃料棒本数は68本であり、このうち、ペレット最高ウラン濃縮度の燃料棒20の本数割合は56/68=82%である。このとき、全燃料棒の燃料集合体当りの平均ウラン濃縮度(以下、適宜「燃料集合体の平均ウラン濃縮度」という)は4.25wt%である。また、上下端部のブランケット領域を除いた濃縮燃料部における燃料集合体10の一横断面での平均ウラン濃縮度(以下、適宜「燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度」という)は4.75wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は5/4.75=1.05である。

【0027】ウォータロッド30は各々2×2相当の大きさの横断面円形のウォータロッドであり、その減速材横断面積の合計は10cm<sup>2</sup>である。これらウォータロッド30は燃料棒が12本配置可能な領域に配置されている。

【0028】図2に上記燃料集合体10の全体構成を示す。燃料棒20、21、22、23及びウォータロッド30は上端を上部タイプレート7に支持され、下端を下部タイプレート8に支持され、かつ中間部の7箇所を1~7段のスペーサ9により保持されている。チャンネルボックス31はこれら燃料棒及びウォータロッドで構成された燃料バンドルを取り囲んでいる。

【0029】図3に、上記燃料集合体10の炉心での配置状況を示す。十字型制御棒35を取り囲んで、本実施例の燃料集合体10が4体配置され、1つの燃料ユニットを構成している。この燃料ユニットの1つのコーナに

隣接して中性子検出器計測管 11 が配置されている。この燃料ユニットが多数集まって炉心が構成される。

【0030】次に、本実施例の燃料集合体の作用を説明する。現在の燃料ペレットの製造技術では、燃料集合体に適用できる燃料ペレットの最高ウラン濃縮度に 5.0 wt% という制約がある。本実施例は、このような制約の下で可燃性吸収材を添加した燃料棒に問題を生じることなく、出力ピーキングを小さく抑さえながら平均ウラン濃縮度を高め、45 GWd/t よりも高い取出平均燃焼度を達成せんとするものである。以下、このことを説明する。

【0031】燃料集合体の取出燃焼度を大きくするためには、炉心に装荷する新燃料集合体の燃料ペレットのウラン濃縮度を高めることが必要である。図 4 に、燃料集合体の平均ウラン濃縮度と取出燃焼度との関係を示す。本発明では、取出燃焼度として 45 GWd/t よりも高い燃焼度を狙っており、図 4 から取出燃焼度を 45 GWd/t よりも高くするためには燃料集合体の平均ウラン濃縮度を 4.0 wt% 以上とすることが必要であることが分かる。本実施例の燃料集合体 10 では、上記のようにその平均ウラン濃縮度は 4.25 wt% であり、取出燃焼度は約 50 GWd/t を達成可能である。

【0032】ところで、本実施例では、燃料棒の上下端部に天然ウランのブランケットが設けられている。このように天然ウランブランケットを設けることにより、中性子の洩れを少なくして効率良く燃料を燃やし、一層の高燃焼度化が図れる。

【0033】一方、このように上下端部に天然ウランブランケットを設けたとき、設計上重要なのは上下端部のブランケットを除いた濃縮燃料部のウラン濃縮度である。本実施例では、上下端部の天然ウラン（濃縮度 0.71 wt%）がそれぞれ 2/24 ノード、1/24 ノードずつある。この場合、濃縮燃料部の燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度は 4.5 wt% 以上にすれば、燃料集合体平均ウラン濃縮度を 4.0 wt% 以上になる。このとき、その燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度のペレット最高濃縮度に対する比  $e_{\max} / e_{\text{mean}}$  は  $5/4.5 = 1.11$  以下となる。

【0034】また、一般に、上下端部の天然ウランブランケットとしてはそれぞれ 1/24 ノードずつ付けることも行われている。この場合、濃縮燃料部の燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度は 4.3 wt% 以上にすれば、燃料集合体平均ウラン濃縮度を 4.0 wt% 以上になり、ペレット最高濃縮度に対する比  $e_{\max} / e_{\text{mean}}$  は  $5/4.3 = 1.16$  以下となる。

【0035】本実施例では、上記のように濃縮燃料部の燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度は 4.75 wt% であり、ペレット最高濃縮度に対する比  $e_{\max} / e_{\text{mean}}$  は 1.05 であり、それぞれ上下端部に 2/24 ノード、1/24 ノードずつブランケットを設けた場合

の上記の 4.5 wt% 以上、1.11 以下となっている。

【0036】次に、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を 4.0 wt% 以上に高める場合に配慮しなければならない点として、可燃性吸収材即ちガドリニアを添加した Gd 棒 23 の本数がある。Gd 棒 23 はサイクル初期の余剰反応度を押さえるために用いられるが、高燃焼度化のためウラン濃縮度を増すと、ガドリニアによって抑制しなければならない反応度量が増加するので、ガドリニア入り燃料棒の本数も増やす必要がある。このことは一般に知られているが、今まで、ウラン濃縮度の増加とそれに応じて増やす必要のある Gd 棒の適性本数についての定量的な関係については検討されていない。

【0037】本願発明者等は、燃料集合体の平均ウラン濃縮度の増加とガドリニア入り燃料棒の本数割合とを調べた結果、図 5 に示す関係を得た。ここで、ガドリニア入り燃料棒の本数割合とは、燃料集合体に含まれる全燃料棒本数に占める余剰反応度制御に必要なガドリニア入り燃料棒本数の割合である。この図から、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を 4.0 wt% 以上にすると、その余剰反応度制御に必要なガドリニア入り燃料棒の本数割合は 20% 以上であることが分かる。

【0038】ガドリニア入り燃料棒の本数割合は、図 5 に示すように、燃料集合体の平均ウラン濃縮度に依存する。燃料ペレットの最高ウラン濃縮度を 5 wt% 以下とした本発明の場合、燃料集合体の横断面平均ウラン濃縮度は、最大 5 wt% となる。しかし、後述するように、可燃性吸収材を含む燃料棒やコーナー部燃料棒のローカルピーキングを抑制するため、燃料集合体の横断面平均ウラン濃縮度の最大値は 4.8 wt% となる。

【0039】天然ウランブランケットを設置しない場合を想定すると、燃料集合体の平均ウラン濃縮度の最大値は、横断面平均ウラン濃縮度の最大値である 4.8 wt% 程度まで増大できる。したがって、図 5 に示すように、本発明で対象とする燃料集合体の余剰反応度を制御するためには、全燃料棒に対するガドリニア入り燃料棒の本数割合を 20%～30% とすることが必要である。

【0040】本実施例の燃料集合体 10 では、平均ウラン濃縮度が 4.25 wt% であり、その余剰反応度制御に必要なガドリニア入り燃料棒本数の割合は 22% であるのに対して、上記のように Gd 棒 23 の本数割合は 23% であるので、余剰反応度を適切に制御することができる。

【0041】ここで、ガドリニア入り燃料棒は燃料集合体の最外周に配置すると、反応度を制御する制御棒の近くに同じ減速材が位置することになって制御棒のきき（制御棒価値）が悪くなる。したがって、本実施例では、従来の一般的な考えに従い、Gd 棒 23 は正方格子状の配列の最外周を除いた領域に配置し、制御棒価値の低下を防止する。

【0042】次に、本実施例において、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を4wt%以上の4.25wt%とするために採用した構成について説明する。まず、本発明の基本的な考え方を説明する。

【0043】図6は取出平均燃焼度とウラン濃縮度の関係を示す図である。図中の白丸は燃料集合体の平均ウラン濃縮度であり、その上下に伸びる縦線はウラン濃縮度分布（ウラン濃縮度スプリット）を示す。沸騰水型原子炉の燃料集合体では、燃料棒にウラン濃縮度の差をつけることにより局所出力ピーキングの低減を図る。特に、局所出力ピーキングが発生するのは、中性子減速効果が大きい燃料集合体コーナー領域の燃料棒、ウォータロッドに面した燃料棒である。このため、これらの燃料棒のウラン濃縮度を下げる必要がある。また、前述のようにサイクル初期の余剰反応度を抑えるために、ガドリニアを添加した燃料棒では、ウランのみの燃料棒に比べ燃料棒の熱伝導度が数%悪くなる。このため、たとえ出力が同じでも燃料棒中心温度が高くなり、安全上好ましくないので、ウラン濃縮度を低くする必要がある。一方、目標とする取出平均燃焼度を達成しようとする場合には、平均ウラン濃縮度を保つため前記燃料棒以外の燃料棒のウラン濃縮度を高める必要がある。このように局所出力ピーキングを低減しつつ平均ウラン濃縮度を保つためには、図6に示すようにある程度のウラン濃縮度分布を燃料棒毎につけることが必要である。

【0044】ところで、取出燃焼度を増加させるためにはウラン濃縮度の増加が必要であり、全ての燃料棒のウラン濃縮度を必要濃縮度まで増加させればよい。しかし、実際には外周部やウォータロッド隣接部、ガドリニア入り燃料棒のウラン濃縮度を下げる必要があることは上に述べた通りである。したがって、ウラン濃縮度を増加させるためには燃料集合体の平均ウラン濃縮度より高いウラン濃縮度を有する燃料棒の割合を増加させることが必要である。

【0045】ここで、燃料ペレット製造設備は、その製造能力として扱えるウラン濃縮度に5.0wt%という上限がある。したがって、平均ウラン濃縮度を増加させていく場合、同じ濃縮度スプリットのまま増加させると、ペレット最高ウラン濃縮度はこの製造限界値を越える。この様子を同じく図6に示す。現状では、ペレット最高ウラン濃縮度の製造限界値を5.0wt%以上に引き上げることは許されない。したがって、ペレット最高ウラン濃縮度が製造限界値を越えずに平均ウラン濃縮度を高める方法として、濃縮度スプリットを減らし、ペレット最低ウラン濃縮度を増加させて、より一様な濃縮度分布に近づけて平均ウラン濃縮度を増加させる方法が考えられる。この様子も同じく図6に示す。しかし、燃料棒には線出力密度などの熱的制限値があり、局所出力ピーキングは一定値以下に押さえないといけないので、ペレット最低ウラン濃縮度を増加させることは得策では

ない。そこで、本発明では、局所出力ピーキングを低減しながら平均ウラン濃縮度を高めることを基本とする。

【0046】まず、本発明の局所出力ピーキングを低減する考え方を説明する。燃料集合体周辺部では、比較的中性子減速が起こりやすく、同じウラン濃縮度としても出力が出やすい。この効果は、燃料集合体の4コーナー領域にある12本の燃料棒（各コーナー3本ずつ）、特に各コーナーの合計4本で顕著である。この中性子減速効果を考慮して、線出力密度などの熱的制限値を満足し、出力ピーキングを他の位置にあるウランのみを含む燃料棒と同等にするためには、燃料集合体の4コーナーの合計4本の燃料棒22の平均ウラン濃縮度が最高ウラン濃縮度の0.60から0.76の間となるようにするか、又は4コーナー付近にある12本の燃料棒21、22の平均ウラン濃縮度が最高ウラン濃縮度の0.70から0.86の間となるようにする必要があることが分かった。

【0047】本実施例ではコーナー領域にある4本の燃料棒22のペレットウラン濃縮度は3.60wt%であり、ペレット最高ウランの濃縮度の0.72としている。また、4コーナー領域に位置する燃料棒22に隣接する各2本の燃料棒21のペレットウラン濃縮度を4.30wt%とした。このとき、4コーナー付近にある合計12本の燃料棒21及び22の平均ウラン濃縮度は4.07wt%であり、前記最高ウランの濃縮度の0.81となっている。

【0048】また、可燃性吸収材（Gdなど）を添加した燃料棒では、既に述べたように燃料棒の熱伝導度が数%悪くなるため、安全上、その他の可燃性吸収材を含まない通常のウラン燃料棒出力と同じ燃料棒中心温度とするためには、可燃性吸収材を含む燃料棒のローカルピーキングは可燃性吸収材が燃え尽きる第1サイクルの末期において、その他の燃料棒のローカルピーキングより数%以上小さくするようにすることが効果的である。このため、可燃性吸収材を含む燃料棒の平均ウラン濃縮度は最高ウラン濃縮度の0.84から0.96の間となるように構成するのがよいことが分かった。

【0049】本実施例では、Gd棒23のペレットウラン濃縮度を4.45wt%とした。このとき、Gd棒23の濃縮度はペレット最高ウラン濃縮度の0.89となっている。これによりGd棒23の中心温度はガドリニアを含まない燃料棒と同等の温度とすることができる。

【0050】図7に第1の実施例になる燃料集合体10のローカルピーキング係数の分布を示す。図7(a)は第1サイクルの初期、即ち燃焼度0.0GWd/tにおけるローカルピーキング分布である。本図より、ローカルピーキング係数はコーナー領域が最も大きくなることが分る。しかしながら、ピーキング係数は1.5程度の押さえられており、この値は線出力密度などの熱的制限の観点から許容できる範囲にある。図7(b)は第1サ



イクル末期、即ち燃焼度  $13.2 \text{ GWd/t}$  におけるローカルピーキング係数の分布を示す。Gd棒23のローカルピーキング係数の最大値は1.006であり、その他の燃料棒のローカルピーキング係数の最大値1.125より小さな値となっている。

【0051】次に、本発明の平均ウラン濃縮度を高める考え方を説明する。本発明では、上記のように局所出力ピーキングを小さくしながら平均ウラン濃縮度を高めるものであり、そのためにガドリニア入り燃料棒を最高ウラン濃縮度の0.84~0.96の低濃縮度にするこゝと、コーナー領域の燃料棒を最高ウラン濃縮度の0.70~0.86の低濃縮度にするこゝとや、ガドリニア入り燃料棒の本数割合は30%まで増加することを想定している。また、中性子の洩れを少なくして効率良く燃料を燃やすため、天然ウランブランケットを設けることが望ましいと考えている。一方、上端部に2ノード下端部に1ノードの天然ウランブランケットを設けた場合、平均ウラン濃縮度を4.0wt%以上にするためには、燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度を4.5wt%以上にするこゝとが必要である。即ち、本発明では、ガドリニア及び天然ウランブランケットなどの低濃縮度燃料を最大に使用する条件下においても、燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度を4.5wt%以上にするこゝとが必要である。

【0052】図8は、局所出力ピーキングを従来以下とするために、ガドリニア入り燃料棒のウラン濃縮度を上記範囲0.84~0.95の下限である84%、コーナー領域の燃料棒の濃縮度を上記範囲0.70~0.86の下限である70%とし、残りの燃料棒をペレット最高ウラン濃縮度とした場合のガドリニア入り燃料棒を除くその他の燃料棒のうち、ペレット最高ウラン濃縮度を有する燃料棒の本数割合と燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度の関係を示したものである。この図から、ペレット最高ウラン濃縮度を有する燃料棒の割合を約75%以上にすれば燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度が4.5wt%以上になるこゝとが分かる。即ち、ペレットウラン濃縮度が燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度より高い燃料棒のガドリニア入り燃料棒を除いたその他の燃料棒に対する本数割合を75%以上にすれば、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を4.0wt%以上にするこゝとができる。

【0053】本実施例では、上記のように局所出力ピーキングの起きやすいコーナー領域の合計12本の外周燃料棒21、22とGd棒23以外の燃料棒20を全て製造上限の濃縮度である最高ウラン濃縮度5.0wt%とし、Gd棒23を除いた全ての燃料棒20、21、22のうち燃料棒20の本数割合は82%である。したがって、本実施例によれば、燃料集合体の断面平均ウラン濃縮度を4.5wt%以上の4.75wt%が達成でき、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を4.0wt%以上の4.25wt%が達成できる。

【0054】平均ウラン濃縮度を4.0wt%以上に高

める場合に配慮しなければならない更に他の点として、減速材領域（非沸騰水領域）の大きさ（面積）がある。即ち、濃縮度を増すとき、減速材対燃料比を大きくしないで濃縮度を上げたのでは、中性子のエネルギースペクトルが硬化してしまい、燃料集合体の無限増倍率はその濃縮度における無限増倍率の最大値とはならず、またボイド反応度係数の絶対値が大きくなり過ぎて過渡時の炉心の応答が厳しくなる。このため、減速材領域を増やす必要がある。しかし、 $8 \times 8$ 格子のままでは燃料棒本数が減少し、熱的余裕が小さくなる。このため、本実施例ではウォータロッド30の横断面積の合計を $10 \text{ cm}^2$ とし、 $10 \times 10$ の格子配列を採用している。以下、ウォータロッドの横断面積等の最適化について説明する。

【0055】図9に、燃料棒の格子配列数を $10 \times 10$ とした燃料集合体において、燃料装荷量を一定として、ウォータロッド領域（内側領域の減速材）を増大させた場合と、チャンネルボックス外側のギャップ水領域（外側領域の減速材）を増大させた場合の反応度の変化を比較して示す。横軸にはウォータロッド領域又はギャップ水領域の増分（非沸騰水領域の増分）と、ウォータロッド領域の増分に関しチャンネルボックス内横断面積に対するウォータロッド内横断面積の割合の2つの指標を示し、縦軸には現在使用されているウォータロッド内横断面積である $3 \text{ cm}^2$ （1.7%）を基準とした中性子無限増倍率の差を示す。この図より、中性子無限増倍率の向上にはチャンネルボックスに面した燃料集合体の外側領域より、燃料集合体の内側領域の方が効果的である（感度が高い）こゝとが分かる。これは、中性子束分布の平坦化により、減速材による中性子吸収が減少するためである。熱中性子束分布の平坦化は、燃料経済性だけでなく局所出力分布にも影響を及ぼすため、熱的余裕を確保する点からも重要である。

【0056】このように、 $10 \times 10$ 格子配列の燃料集合体においては、燃料経済性向上のためにはウォータロッド内横断面積を増加するこゝとが効果があり、そのためにウォータロッド内横断面積を現在の $3 \text{ cm}^2$ （1.7%）から増大するこゝとが必要である。一方、ウォータロッド領域の燃料格子数を増大するこゝとは、燃料棒本数の減少になり、高燃焼度化に反することになる。燃料集合体の対称性を考慮すると、 $10 \times 10$ 格子燃料集合体では、ウォータロッド領域の燃料格子数は、現在の2本に対して8本~16本（4倍~8倍）の範囲が妥当である。 $10 \times 10$ 格子燃料集合体の燃料単位格子の面積が、現在の $8 \times 8$ 格子の60%程度になるこゝと、またウォータロッド領域の燃料格子数が上記より4倍~8倍になるこゝとを考えると、ウォータロッド内横断面積としては7（4%）~14（8%） $\text{cm}^2$ の範囲が適切である。

【0057】本実施例では、上記のようにウォータロッド30の横断面積の合計は7~14 $\text{cm}^2$ の範囲内の

約10cm<sup>2</sup>であり、これにより反応度を高め、燃料経済性を向上できる。

【0058】また、ウォータロッドの横断面積を増加するには、大型ウォータロッドの採用が、犠牲にしないで、はならない燃料棒本数を減少できる点、更に燃料棒冷却効果の小さな冷却材流路面積が減少できる（限界出力を増大する）点で有利である。ウォータロッドとウォータロッドに隣接する燃料棒との間隔を一定とすると、円形ウォータロッドの場合には、上記スペースの有効利用の点で2×2の燃料格子をウォータロッドにすることが最も優れている。

【0059】したがって、本実施例では、中性子減速効果が小さな燃料集合体中央領域の12本の燃料棒が配置可能な領域をウォータロッド領域とし、2×2相当の大きさの大型で円形のウォータロッド30を4本配置し、燃料棒冷却効果の小さな冷却材流路面積が減少した構成となっている。これは、限界出力を増大することになる。

【0060】次に、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を4.0wt%以上に高めるための燃料棒の配列について説明する。

【0061】上述したように、本発明では局所出力ピーキングを低減しながら平均ウラン濃縮度を高めるため、ペレットウラン濃縮度が燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度より高い燃料棒のガドリニア入り燃料棒を除いたその他の燃料棒に対する本数割合を75%以上にすることが必要である。このためには、燃料集合体横断面平均ウラン濃縮度より高いペレットウラン濃縮度を有する燃料棒の本数を可能な限り増加させることが重要である。この観点から、本実施例では、

(1) 燃料集合体外周部の燃料棒、特に4コーナー領域にある4～12本の燃料棒（各コーナー3本づつ）；

(2) ウォータロッド周りの燃料棒；

(3) 可燃性吸収材を含む燃料棒；を除いた燃料棒20のウラン濃縮度を天然ウランブランケットを除いた部分で5.0wt%のペレット最高ウラン濃縮度とし、その他の燃料棒のペレットウラン濃縮度をこれよりも小さくしている。

【0062】また、本実施例では、可燃性吸収材入り燃料棒をウォータロッド周りに配置することで、上記

(2) 及び (3) の構成を実現している。即ち、ウォータロッドの周りでも、中性子減速効果が大きく、ウォータロッド隣接燃料棒の局所出力ピーキングが増加することになるので、濃縮度の低減を図ることが望まれ、一方で既に述べたように可燃性吸収材入り燃料棒では燃料熱伝導の観点からウラン濃縮度を低くしなければいけない。本実施例では、可燃性吸収材入り燃料棒をウォータロッド周りに配置することにより、出力は比較的大きくなりやすい位置での出力ピーキングを低く押さえるとともに、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を高められるとい

う効果が得られる。

【0063】このように、上記(1)のコーナー領域にある4～12本の燃料棒、上記(2)のウォータロッド周りの燃料棒及び上記(3)の可燃性吸収材を含む燃料棒を除いた燃料棒のウラン濃縮度を一様に燃料集合体で最高の値とし、その他の燃料棒のウラン濃縮度をこれより小さくすると共に、上記(2)のウォータロッド周りの燃料棒として可燃性吸収材を含む燃料棒を配置することが、最高ウラン濃縮度に制約が課せられた場合に、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を高めて高燃焼度化を図るのに効果がある。

【0064】また、高燃焼度化した場合には、燃料集合体内の可燃性吸収材入り燃料棒の本数が増え、ウォータロッドの周りにできるだけ多くの可燃性吸収材入り燃料棒を配置する方が上記の平均ウラン濃縮度を高める等の効果が大きい。燃料棒の配列が10行10列以上の燃料集合体では、ウォータロッドの周りにできるだけ多くの可燃性吸収材入り燃料棒を配置すると、その本数は可燃性吸収材入り燃料棒の総本数の1/2以上となる。

【0065】以上の理由により、本実施例では、Gd棒23の1/2以上をウォータロッド30の周りに配置し、燃料集合体10の4コーナー領域にある12本の燃料棒21、22及びGd棒23を除いた燃料棒20のウラン濃縮度を5.0wt%のペレット最高ウラン濃縮度としており、これにより最高ウラン濃縮度に5.0wt%という制約が課せられた場合に、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を高めて高燃焼度化を図ることができる。

【0066】したがって、本実施例によれば、最高ウラン濃縮度に5.0wt%という制約が課せられた場合に、ガドリニア入り燃料棒に問題を生じることなく、また線出力密度などの熱的制限値を満足しながら、燃料集合体の平均ウラン濃縮度を高めて取出平均燃焼度を45GWd/tよりも高燃焼度化することが可能となり、またこの高燃焼度化によって燃料経済性向上、使用済燃料発生量低減を達成できる。

【0067】本発明の第2の実施例を図10により説明する。第1の実施例では、燃料棒配列を10行10列とした燃料集合体に本発明を適用したが、本実施例は燃料棒配列を11行11列とした燃料集合体13においてペレット最高ウラン濃縮度を5.0wt%とした場合のものである。

【0068】図10において、本実施例の燃料集合体13は、複数の燃料棒203、213、223、233と、2本の太径ウォータロッド303とを有し、これら燃料棒203～233及びウォータロッド303はチャンネルボックス31内に配置されている。これら燃料棒のうち、燃料棒213、223は燃料集合体13の4つのコーナー領域にある燃料棒であり、燃料棒233は可燃性吸収材、即ちガドリニアを含むGd棒であり、燃料棒203はそれ以外の燃料棒である。これら燃料棒20

3〜233は、燃料有効部の2/24の上端部と1/24の下端部を除いた21/24の領域に様なウラン濃縮度の燃料ペレットが充填され、2/24の上端部と1/24の下端部に天然ウランを燃料とするブランケットが形成されている。

【0069】燃料棒203は68本あり、ペレットウラン濃縮度は5.0wt%、即ち最高ウラン濃縮度であり、4つのコーナー領域に位置する4本の燃料棒223のペレットウラン濃縮度は3.6wt%であり、燃料棒223に隣接する8本の燃料棒213のペレットウラン濃縮度は4.3wt%である。また、Gd棒233は24本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.45wt%である。Gd棒233はそのうちの1/2以上の18本がウォータロッド303に面して配置されている。また、Gd棒233は制御棒の正方格子状配列の最外周を除いた領域に配置されている。上下端部のブランケット領域における天然ウランの濃縮度は0.71wt%である。

【0070】燃料棒203, 213, 223, 233の総本数は104本であり、Gd棒の全燃料棒に対する本数割合は24/104=23%である。Gd棒233のペレットウラン濃縮度4.45wt%は、ペレット最高ウラン濃縮度の5.0wt%とペレット最低ウラン濃縮度の3.6wt%間にある。Gd棒233を除いた燃料棒本数は80本であり、このうち、ペレット最高ウラン濃縮度の燃料棒203の本数割合は68/80=85%である。このとき、燃料集合体13の平均ウラン濃縮度は4.26wt%まで高くすることができ、更なる高燃焼度化が図れる。また、燃料集合体13の上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.77wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は5/4.77=1.05である。

【0071】ウォータロッド303は各々3×3相当の大きさの横断面円形のウォータロッドであり、その減速材横断面積の合計は10cm<sup>2</sup>である。これらウォータロッド303は燃料棒が17本配置可能な領域に配置されている。

【0072】本実施例によっても、第1の実施例と同様の効果が得られる。

【0073】本発明の第3の実施例を図11により説明する。本実施例は上記第2の実施例の変形例である。即ち、本実施例の燃料集合体13Aは、図10に示す燃料集合体13において、コーナー領域の燃料棒223に隣接する燃料棒213をペレット最高ウラン濃縮度5.0wt%の燃料棒203に置き換えたものである。燃料棒配列を11行11列にすると、燃料棒1本の熱的負担が少なくなるので、コーナー領域の燃料棒223に隣接する燃料棒のウラン濃縮度を低下させないことも可能であり、これにより4コーナー領域の4本の燃料棒223、

Gd棒以外の燃料棒203の本数を76本に増やせる。即ち、ペレット最高ウラン濃縮度の燃料棒203の本数割合は76/80=95%である。このとき、燃料集合体13Aの平均ウラン濃縮度は4.31wt%まで高くすることができ、更なる高燃焼度化が図れる。また、燃料集合体13Aの上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.82wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は5/4.82=1.04である。

【0074】本発明の第4の実施例を図12により説明する。本実施例は燃料棒配列を10行10列とした燃料集合体15においてペレット最高ウラン濃縮度を4.95wt%とした場合のものである。

【0075】図12において、本実施例の燃料集合体15は、複数の燃料棒203, 213, 225, 235, 405と、3本の太径ウォータロッド305とを有し、これら燃料棒205〜235, 405及びウォータロッド305はチャンネルボックス31内に配置されている。これら燃料棒のうち、燃料棒215, 225は燃料集合体15の4つのコーナー領域にある燃料棒であり、燃料棒235は可燃性吸収材、即ちガドリニアを含むGd棒であり、燃料棒205, 405はそれ以外の燃料棒である。燃料棒205〜235は、燃料有効部の2/24の上端部と1/24の下端部を除いた21/24の領域に様なウラン濃縮度の燃料ペレットが充填され、2/24の上端部と1/24の下端部に天然ウランを燃料とするブランケットが形成されている。一方、燃料棒405は燃料棒205〜235より短い部分長燃料棒であり、本実施例では燃料棒有効長部分、即ち燃料ペレットが充填されている部分は、他の燃料棒の軸方向14/24に位置する。部分長燃料棒405にはブランケットは設けられていない。

【0076】燃料棒205は46本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.95wt%、即ち最高ウラン濃縮度であり、4つのコーナー領域に位置する4本の燃料棒225のペレットウラン濃縮度は3.5wt%であり、燃料棒225に隣接する8本の燃料棒215のペレットウラン濃縮度は4.5wt%である。また、Gd棒235は20本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.5wt%である。Gd棒235は制御棒の正方格子状配列の最外周を除いた領域に配置されている。上下端部のブランケット領域における天然ウランの濃縮度は0.71wt%である。部分長燃料棒405は12本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.95wt%即ち燃料棒205と同じ最高ウラン濃縮度である。

【0077】燃料棒205, 215, 225, 235, 405の総本数は90本であり、Gd棒235の全燃料棒に対する本数割合は20/90=22%である。Gd棒235のウラン濃縮度4.5wt%は、ペレット最高ウラン濃縮度の4.95wt%とペレット最低ウラン濃

縮度の3.5wt%間にある。Gd棒235を除いた燃料棒本数は70本であり、このうち、最高ウラン濃縮度を有する燃料棒205、405の本数割合は $58/70=83\%$ である。このとき、燃料集合体15の平均ウラン濃縮度は4.29wt%まで高くすることができる。また、燃料集合体15の上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.75wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は $4.95/4.75=1.04$ である。

【0078】部分長燃料棒405の燃料有効長部よりも上方の横断面では、Gd棒235を除いた燃料棒本数は58本であり、このうち、最高ウラン濃縮度の燃料棒205の本数割合は $46/58=79\%$ である。このとき、燃料集合体15の上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.71wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は $4.95/4.71=1.05$ である。

【0079】ウォータロッド305は各々 $2\times 2$ 相当の大きさの横断面円形のウォータロッドであり、その減速材横断面積の合計は $10\text{cm}^2$ である。これらウォータロッド305は燃料棒が10本配置可能な領域に配置されている。

【0080】本実施例によっても、第1の実施例と同様の効果が得られる。

【0081】本発明の第5の実施例を図13により説明する。本実施例は燃料棒配列を9行9列とした燃料集合体17においてペレット最高ウラン濃縮度を4.95wt%とした場合のものである。

【0082】図13において、本実施例の燃料集合体17は、複数の燃料棒207、217、227、237、407と、2本の太径ウォータロッド307とを有し、これら燃料棒207～237、407及びウォータロッド307はチャンネルボックス31内に配置されている。これら燃料棒のうち、燃料棒217、227は燃料集合体17の4つのコーナー領域にある燃料棒であり、燃料棒237は可燃性吸収材、即ちガドリニアを含むGd棒であり、燃料棒207、407はそれ以外の燃料棒である。燃料棒207～237は、燃料有効部の $2/24$ の上端部と $1/24$ の下端部を除いた $21/24$ の領域に一樣なウラン濃縮度の燃料ペレットが充填され、 $2/24$ の上端部と $1/24$ の下端部に天然ウランを燃料とするブランケットが形成されている。一方、燃料棒407は燃料棒207～237より短い部分長燃料棒であり、本実施例では燃料棒有効長部分、即ち燃料ペレットが充填されている部分は、他の燃料棒の軸方向 $14/24$ に位置する。部分長燃料棒407にはブランケットは設けられていない。

【0083】燃料棒207は38本あり、そのペレット

ウラン濃縮度は4.95wt%、即ち最高ウラン濃縮度であり、4つのコーナー領域に位置する4本の燃料棒227のペレットウラン濃縮度は3.2wt%であり、燃料棒227に隣接する8本の燃料棒217のペレットウラン濃縮度は4.2wt%である。また、Gd棒237は16本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.4wt%である。Gd棒237は制御棒の正方格子状配列の最外周を除いた領域に配置されている。上下端部のブランケット領域における天然ウランの濃縮度は0.71wt%である。部分長燃料棒407は8本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.95wt%即ち燃料棒207と同じ最高ウラン濃縮度である。

【0084】燃料棒207、217、227、237、407の総本数は74本であり、Gd棒237の全燃料棒に対する本数割合は $16/74=22\%$ である。Gd棒237のペレットウラン濃縮度4.4wt%は、ペレット最高ウラン濃縮度の4.95wt%とペレット最低ウラン濃縮度の3.2wt%間にある。Gd棒237を除いた燃料棒本数は58本であり、このうち、ペレット最高ウラン濃縮度を有する燃料棒207、407の本数割合は $46/58=79\%$ である。このとき、燃料集合体17の平均ウラン濃縮度は4.19wt%まで高くすることができる。また、燃料集合体17の上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.66wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は $4.95/4.66=1.07$ である。

【0085】部分長燃料棒407の燃料有効長部よりも上方の横断面では、Gd棒237を除いた燃料棒本数は50本であり、このうち、最高ウラン濃縮度の燃料棒207の本数割合は $38/50=76\%$ である。このとき、燃料集合体17の上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.62wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は $4.95/4.62=1.07$ である。

【0086】ウォータロッド307は各々 $2\times 2$ 相当の大きさの横断面円形のウォータロッドであり、その減速材横断面積の合計は $9\text{cm}^2$ である。これらウォータロッド307は燃料棒が7本配置可能な領域に配置されている。

【0087】本実施例によっても、第1の実施例と同様の効果が得られる。また、本実施例では、部分長燃料棒407を最外層に配置したので、特願平4-210539に記載のようにボイド係数の低減効果が得られ、反応度制御性が向上する。

【0088】本発明の第6の実施例を図14～図17により説明する。本実施例は、図13の実施例において、ウォータロッド307を、炉心流量によって軸方向水位が変わる所謂スペクトルシフトロッド307Aに変更し

たものである。

【0089】スペクトルシフトロッド307Aの詳細構造を図15及び図16に示す。スペクトルシフトロッド307Aは、特開昭63-73187号公報に記載のように、内管30、外管31及びスペーサ32から構成される。外管31と内管30とは同心円状に配置され、外管31が内管30の外周を取り囲んでいる。外管31の上端はカバー部33にて密封されており、カバー部33の上部が上部タイプレート7内に挿入されて保持される。カバー部33は、内管30の上端との間に間隙を形成するように内管30の上端を絞っている。内管30の上端部は、スペクトルシフトロッド307Aの軸心から放射状に配置された板状のスペーサ32を介して外管31の内面に固定される。外管31の下端は封鎖部34にて封鎖される。内管30の下端部は、封鎖部34を貫通してそれよりも下方に突出している。内管30の下端部は、下部タイプレート8の燃料棒支持部14を貫通している。内管30の下端に形成された冷却水流入口38は、下部タイプレート8の空間15に開口している。内管30の内部が冷却水上昇流路35を形成し、内管30と外管31との間に形成される環状通路が冷却水下降流路36を形成している。外管31の下端部の管壁に、周方向に複数の冷却水吐出口39が形成される。これ等の冷却水吐出口39は、周方向に等間隔に設けられている。冷却水吐出口39は、燃料棒支持部14よりも上方の領域に開口している。本実施例では、燃料棒支持部14が抵抗体の機能を有している。冷却水上昇流路35と冷却水下降流路36とは、スペクトルシフトロッド307Aの上端部に形成された反転部37によって連結されている。このようにスペクトルシフトロッド307Aは、内部に冷却水上昇流路35、冷却水下降流路36及び反転部37からなる逆U字状の冷却水流路を有している。

【0090】本実施例の燃料集合体17Aを沸騰水型原子炉の炉心内に装荷して（全燃料集合体が燃料集合体17A）沸騰水型原子炉を運転すると、冷却水の大部分は、下部タイプレート8の内部空間及び燃料棒支持部14に設けられた貫通口18を通して炉心に装荷された燃料集合体17Aの燃料棒相互間に直接導入される。下部タイプレート8の内部空間に流入した冷却水の残りの部分は、冷却水流入口38からスペクトルシフトロッド307Aの冷却水上昇流路35内に流入し、更に反転部37及び冷却水下降流路36を介して冷却水吐出口39から燃料棒支持部14より上方の領域に吐出される。冷却水吐出口39から吐出される冷却水は、冷却水流入口38からスペクトルシフトロッド307A内に流入する冷却水の流量の多少に応じて液体又は気体（蒸気）となる。本実施例は、炉心流量100%以下で冷却水上昇流路35内に液面ができる状態がスペクトルシフトロッド307A内に生じ、炉心流量110%で冷却水上昇流路

35及び冷却水下降流路36内はほとんど単相流となる状態がスペクトルシフトロッド307A内に生じるように、燃料棒支持部14の圧力損失、内管30及び外管31の仕様が予め設定されている。

【0091】スペクトルシフトロッド307Aは、このように炉心流量によってスペクトルシフトロッド内の水位を変えることにより中性子減速効果を調整でき、その結果、反応度制御あるいは出力制御に活用できる。この作用の詳細は特開昭63-73187号公報に記載されている。

【0092】ところで、BWR燃料集合体では、前記のように余剰反応度をガドリニアで制御している。したがって、運転サイクル初期では、新燃料に含まれるガドリニアとスペクトルシフトロッドの相互作用を考慮する必要がある。図16は、炉心流量を燃焼初期から徐々に増やしスペクトルシフトロッド307A内の蒸気体積率を100%から0%に変化したときの、中性子無限増倍率の変化を示している。ガドリニアが存在する寿命初期は、スペクトルシフトロッド内の水位が下がることで中性子無限増倍率が逆に上がることがわかる。これは、中性子減速効果が損なわれることで、ガドリニアによる熱中性子吸収が減少した結果である。即ち、スペクトルシフトロッド内の水位による反応度制御あるいは出力制御を効果的に行うためには、ガドリニア量を減少する必要がある。

【0093】本実施例では、第5の実施例で述べたように部分長燃料棒407の配置により反応度制御効果が向上し、炉停止余裕が改善されるので、ガドリニア量を減少することが可能である。その結果、燃料経済性が向上すると共に、スペクトルシフトロッドの効果を最大限に引き出すことができる。

【0094】本発明の第7の実施例を図18により説明する。本実施例は、図13の実施例において、部分長燃料棒407の配置を変えたものである。即ち、図18において、本実施例の燃料集合体17Bに用いられる部分長燃料棒407は全て格子状燃料配列の最外層から2層目に配置されている。他の構成は図13の実施例と同じである。本実施例によっても、第1の実施例と同様の効果が得られる。

【0095】本発明の第8の実施例を図19により説明する。本実施例は燃料棒配列を9行9列とした燃料集合体19において最高ウラン濃縮度を5.0wt%とし、ウォータロードの横断面を矩形とした場合のものである。

【0096】図19において、本実施例の燃料集合体19は、複数の燃料棒209、219、229、239と、1本の横断面矩形の太径ウォータロード309とを有し、これら燃料棒207～237、407及びウォータロード307はチャンネルボックス31内に配置されている。これら燃料棒のうち、燃料棒219、229は

燃料集合体17の4つのコーナー領域にある燃料棒であり、燃料棒239は可燃性吸収材、即ちガドリニアを含むGd棒であり、燃料棒209はそれ以外の燃料棒である。燃料棒209～239は、燃料有効部の2/24の上端部と1/24の下端部を除いた21/24の領域に一樣なウラン濃縮度の燃料ペレットが充填され、2/24の上端部と1/24の下端部に天然ウランを燃料とするブランケットが形成されている。

【0097】燃料棒209は44本あり、そのペレットウラン濃縮度は5.0wt%、即ち最高ウラン濃縮度であり、4つのコーナー領域に位置する4本の燃料棒229のペレットウラン濃縮度は3.6wt%であり、燃料棒229に隣接する8本の燃料棒219のペレットウラン濃縮度は4.3wt%である。また、Gd棒239は16本あり、そのペレットウラン濃縮度は4.45wt%である。Gd棒239は制御棒の正方格子状配列の最外周を除いた領域に配置されている。上下端部のブランケット領域における天然ウランの濃縮度は0.71wt%である。

【0098】燃料棒209, 219, 229, 239の総本数は72本であり、Gd棒239の全燃料棒に対する本数割合は $16/72=22\%$ である。Gd棒239のペレットウラン濃縮度4.45wt%は、ペレット最高ウラン濃縮度の5.0wt%とペレット最低ウラン濃縮度の3.6wt%間にある。Gd棒239を除いた燃料棒本数は56本であり、このうち、ペレット最高ウラン濃縮度を有する燃料棒209の本数割合は $44/56=79\%$ である。このとき、燃料集合体19の平均ウラン濃縮度は4.22wt%まで高くすることができる。また、燃料集合体19の上下端部のブランケット領域を除いた濃縮度燃料部の平均ウラン濃縮度は4.72wt%であり、ペレット最高ウラン濃縮度に対する比 $e_{max}/e_{mean}$ は $5.0/4.72=1.06$ である。

【0099】横断面矩形のウォータロッド309は3×3相当の大きさを有し、その減速材横断面積は14cm<sup>2</sup>である。このウォータロッド309は燃料棒が9本配置可能な領域に配置されている。

【0100】本実施例によっても、第1の実施例と同様の効果が得られる。

【0101】

【発明の効果】本発明によれば、最高ウラン濃縮度に5.0wt%という制約が課せられた場合に、ガドリニア入り燃料棒に問題を生じることなく、また線出力密度などの熱的制限値を満足しながら、平均ウラン濃縮度を高めて取出平均燃焼度を45GWd/tよりも高燃焼度化することが可能となり、またこの高燃焼度化によって燃料経済性向上、使用済燃料発生量低減を達成できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施例による燃料集合体の横断

面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図2】図1に示す燃料集合体の全対向製を示す縦断面図である。

【図3】図1に示す燃料集合体の炉心での配置状況を示す図である。

【図4】燃料集合体の平均ウラン濃縮度と取出燃焼度との関係を示す図である。

【図5】燃料集合体の平均ウラン濃縮度とガドリニア入り燃料棒本数割合との関係を示す図である。

【図6】ウラン濃縮度と取出平均燃焼度の関係図を示す図である。

【図7】図1に示す燃料集合体のローカルピーキング分布図である。

【図8】ガドリニア入り燃料棒を除くその他の燃料棒のうち、ペレット最高ウラン濃縮度を有する燃料棒の割合と燃料集合体断面平均ウラン濃縮度の関係を示す図である。

【図9】減速材領域の増大による反応度向上効果を示す図である。

【図10】本発明の第2の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図11】本発明の第3の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図12】本発明の第4の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図13】本発明の第5の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図14】本発明の第6の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図15】スペクトルシフトロッドの構造を示す部分断面正面図である。

【図16】図15のXVI-XVI線断面図である。

【図17】スペクトルシフトロッド内の蒸気体積率が100%から0%に変化したときの中性子無限増倍率と燃焼度との関係を示す図である。

【図18】本発明の第7の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【図19】本発明の第8の実施例による燃料集合体の横断面図及びその燃料棒の構成を示す図である。

【符号の説明】

10; 13; 13A; 15; 17; 17A; 17G; 19 燃料集合体

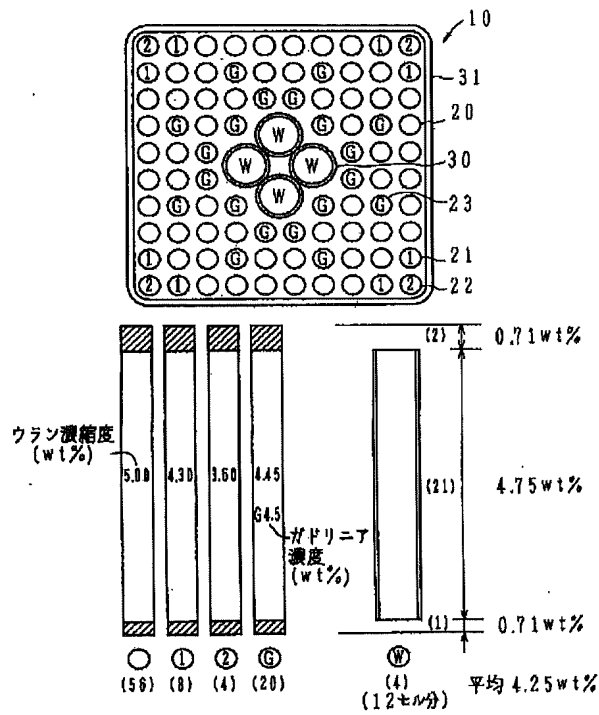
20; 203; 205; 207; 209 最高ウラン濃縮度の燃料棒

21, 22; 213, 223; 215, 225; 217, 227 219, 229 低濃縮度の燃料棒

23; 233; 235; 237; 239 ガドリニア入り燃料棒

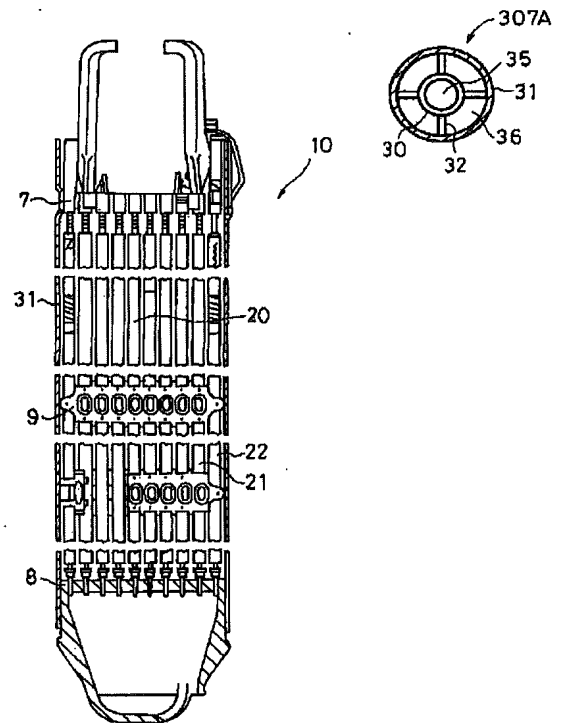
30; 303; 305; 307; 307A; 309 ウォータロッド

【図1】

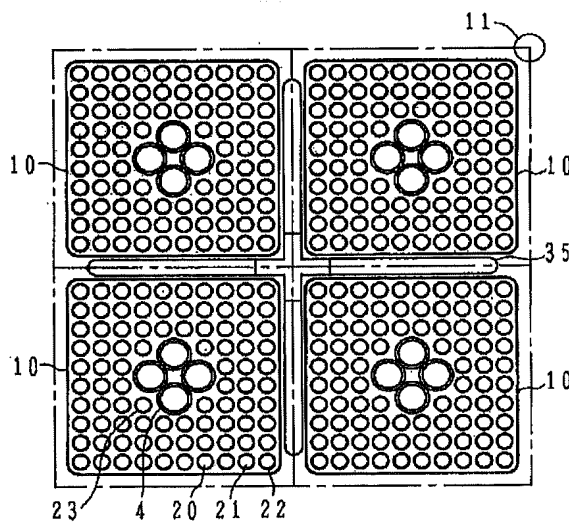


- 10 : 燃料集合体  
 20 : 最高ウラン濃縮度の燃料棒  
 21, 22 : 低濃縮度の燃料棒  
 23 : ガドリニア入り燃料棒  
 30 : ウォータロッド

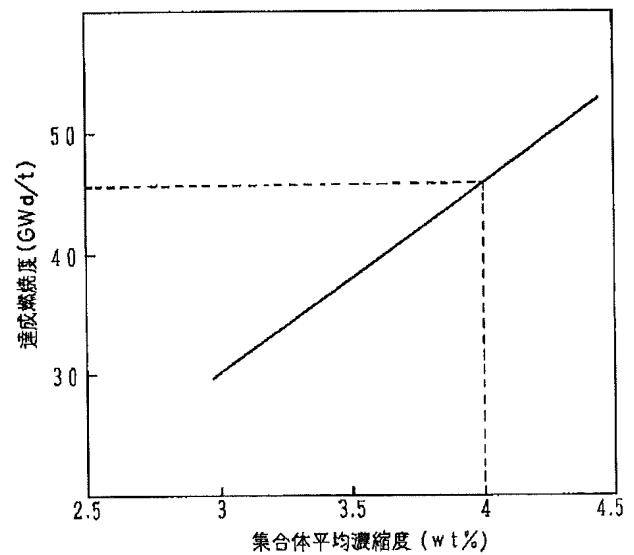
【図2】



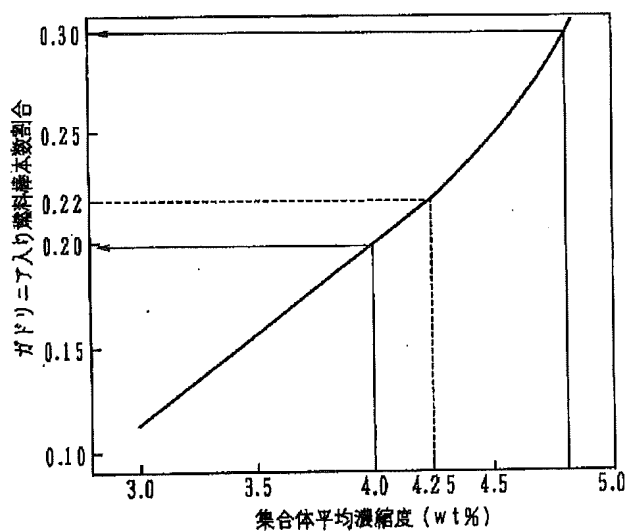
【図3】



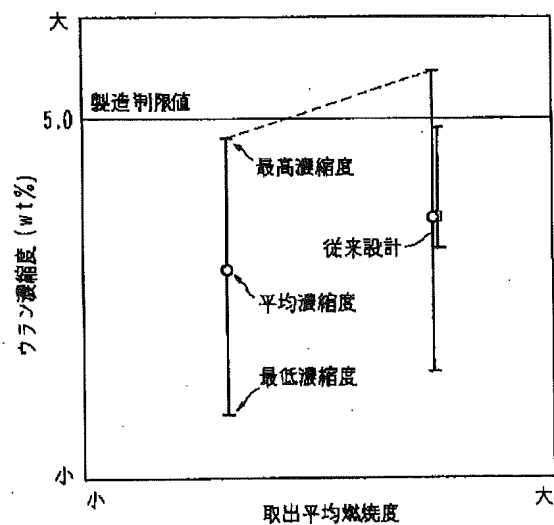
【図4】



【図5】



【図6】



【図7】

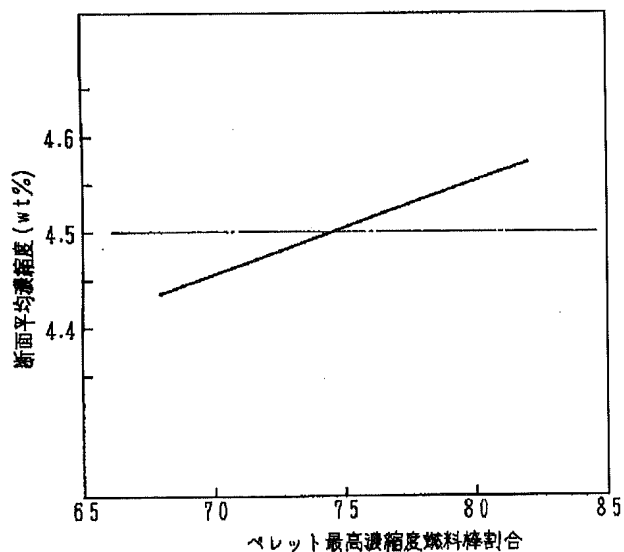
(a)  
燃焼度 0.0 Gwd/t

1.510	1.411	1.312	1.253	1.219	1.219	1.254	1.374	1.412	1.513
1.411	1.214	1.029	0.467	0.881	0.881	0.468	1.030	1.215	1.415
1.372	1.029	0.901	0.826	0.447	0.447	0.826	0.903	1.031	1.380
1.253	0.467	0.825	0.515	0.0	0.0	0.516	0.827	0.463	1.266
1.219	0.881	0.447	0.0	0.0	0.0	0.0	0.447	0.885	1.228
1.219	0.881	0.447	0.0	0.0	0.0	0.0	0.447	0.885	1.228
1.254	0.468	0.826	0.516	0.0	0.0	0.516	0.828	0.463	1.266
1.374	1.030	0.903	0.827	0.447	0.447	0.828	0.905	1.033	1.381
1.412	1.215	1.031	0.463	0.885	0.885	0.463	1.033	1.217	1.416
1.513	1.415	1.380	1.266	1.228	1.228	1.266	1.381	1.416	1.516

(b)  
燃焼度 13.2 Gwd/t

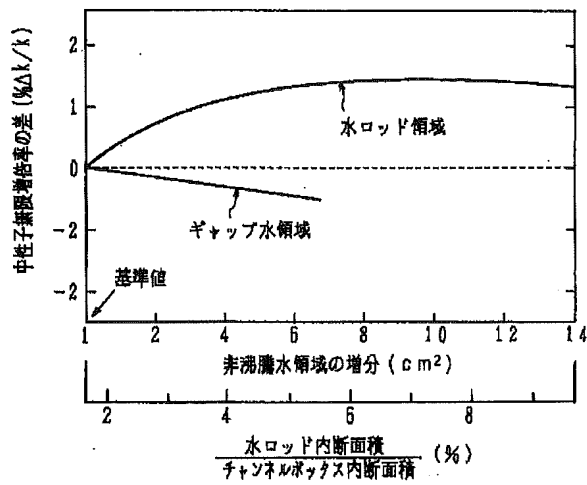
1.108	1.101	1.124	1.094	1.074	1.074	1.094	1.125	1.100	1.109
1.101	1.026	0.959	0.815	0.946	0.946	0.815	0.959	1.025	1.102
1.124	0.959	0.926	0.966	0.888	0.888	0.966	0.927	0.958	1.125
1.094	0.815	0.966	1.006	0.0	0.0	1.006	0.966	0.814	1.096
1.074	0.946	0.888	0.0	0.0	0.0	0.0	0.888	0.944	1.074
1.074	0.946	0.888	0.0	0.0	0.0	0.0	0.888	0.944	1.074
1.095	0.815	0.966	1.006	0.0	0.0	1.006	0.966	0.814	1.096
1.125	0.959	0.927	0.966	0.888	0.888	0.966	0.927	0.958	1.125
1.100	1.025	0.958	0.814	0.944	0.944	0.814	0.958	1.023	1.101
1.109	1.102	1.125	1.095	1.074	1.074	1.095	1.125	1.101	1.110

【図8】

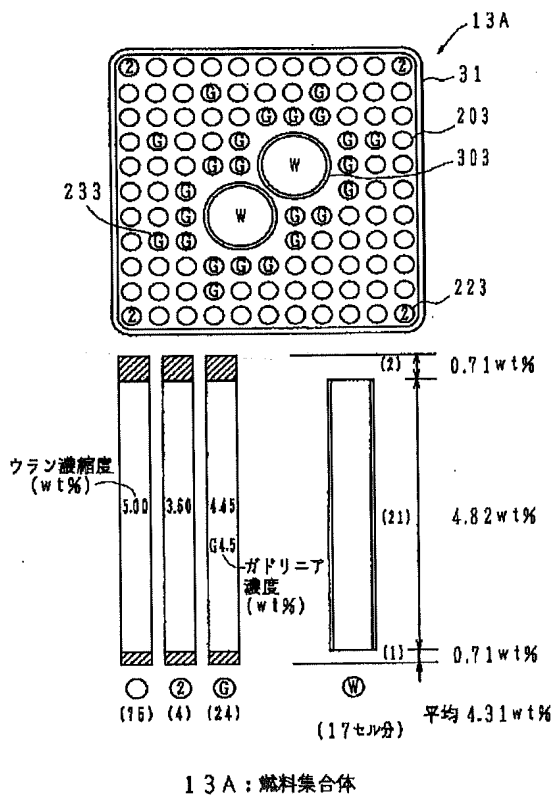




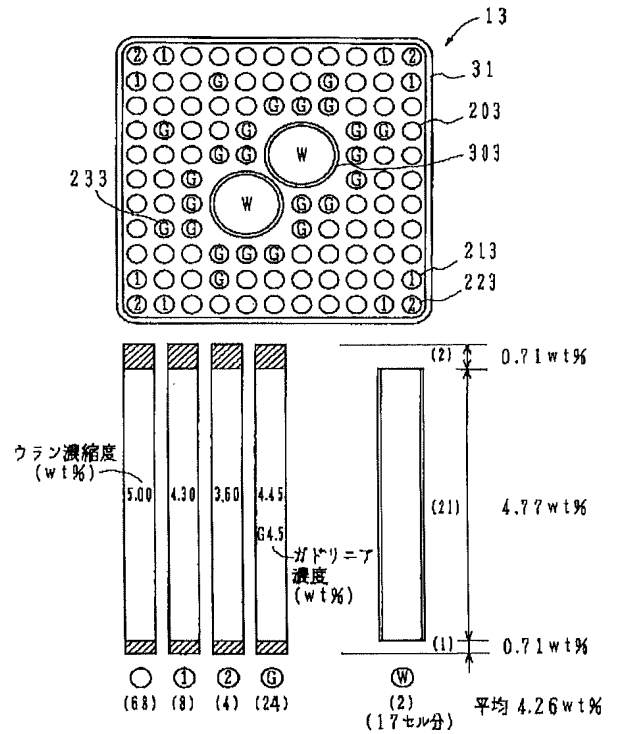
【図 9】



【図 11】

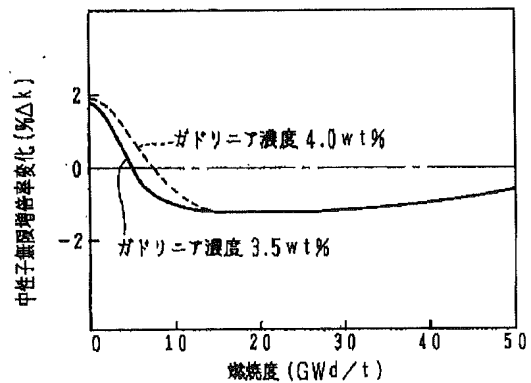


【図 10】

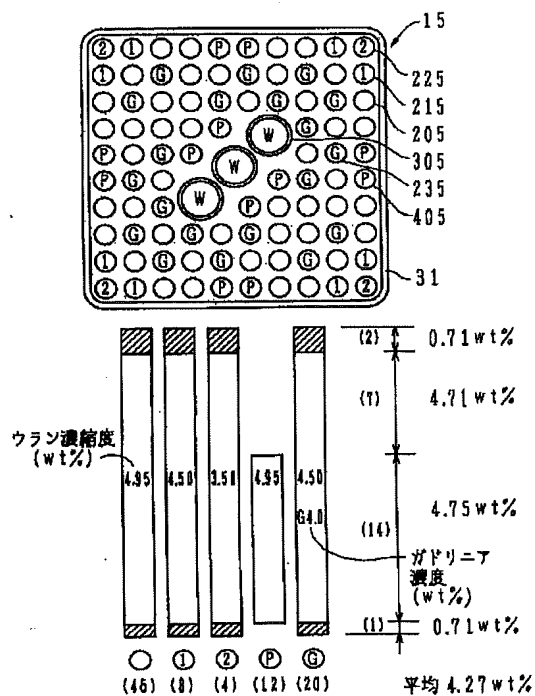


- 13: 燃料集合体
- 203: 最高ウラン濃縮度の燃料棒
- 213: 低濃縮度の燃料棒
- 233: ガドリニア入り燃料棒
- 303: ウォータロッド

【図 17】

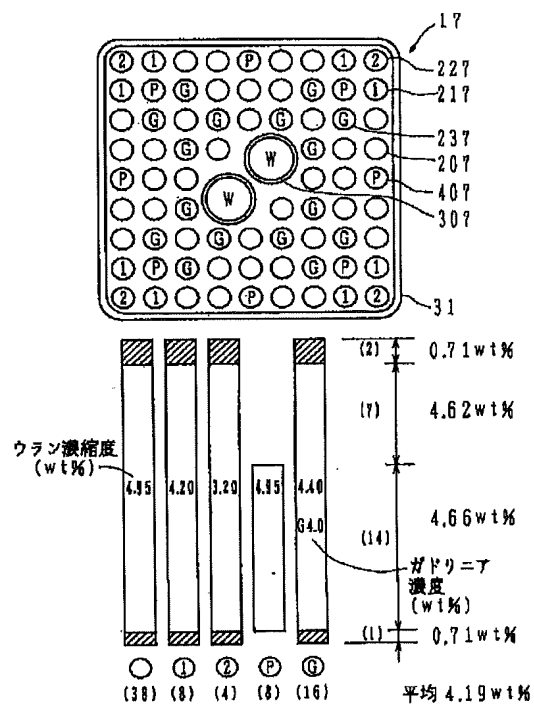


【図12】



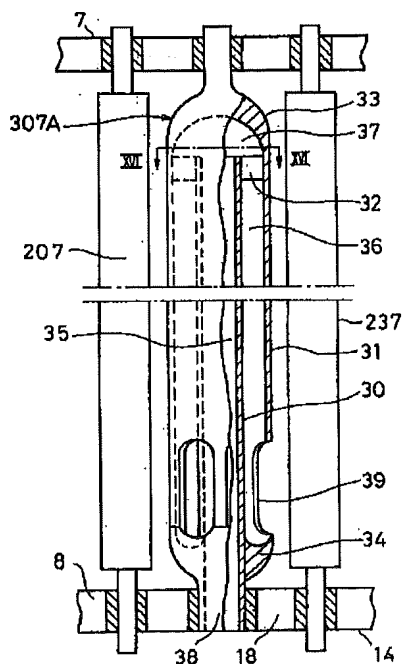
- 15: 燃料集合体  
 205: 最高ウラン濃縮度の燃料棒  
 223: 低濃縮度の燃料棒  
 235: ガドリニア入り燃料棒  
 305: ウォータロッド

【図13】

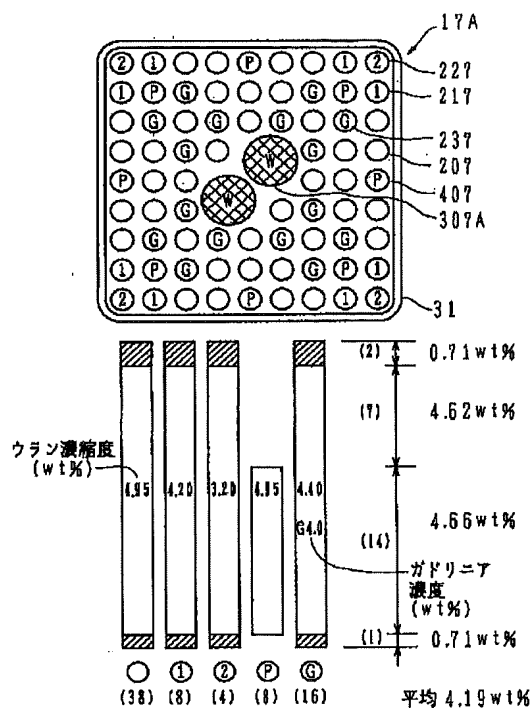


- 13: 燃料集合体  
 207: 最高ウラン濃縮度の燃料棒  
 227: 低濃縮度の燃料棒  
 237: ガドリニア入り燃料棒  
 307: ウォータロッド

【図15】

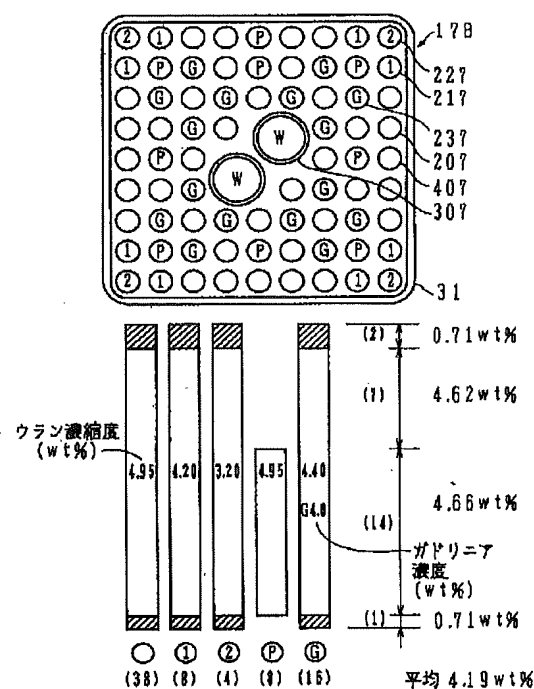


【図14】



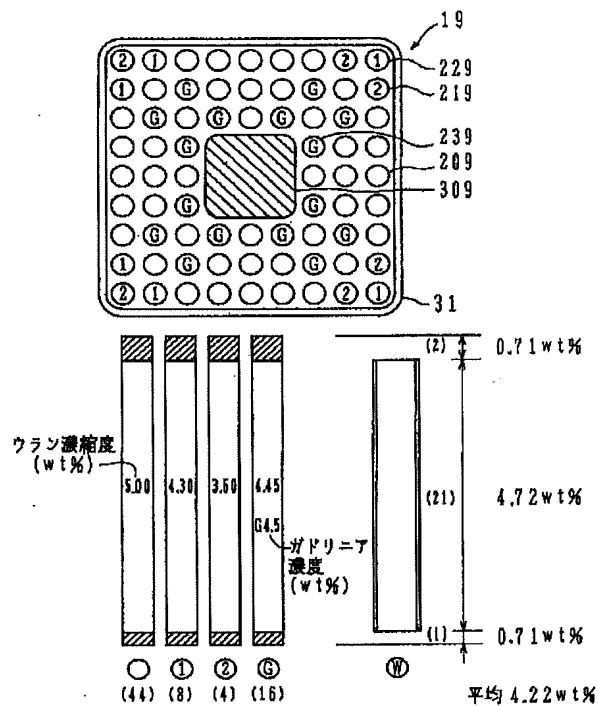
17A: 燃料集合体  
307A: スペクトルシフトロッド

【図18】



17B: 燃料集合体

【図19】



- 19 : 燃料集合体  
 209 : 最高ウラン濃縮度の燃料棒  
 219, 229 : 低濃縮度の燃料棒  
 239 : ガドリニア入り燃料棒  
 309 : ウォータロッド

フロントページの続き

(72)発明者 配川 勝正  
 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会  
 社日立製作所日立工場内

(72)発明者 梅原 肇  
 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会  
 社日立製作所日立工場内

(72)発明者 横溝 修  
 茨城県日立市森山町1168番地 株式会  
 社日立製作所エネルギー研究所内

(72)発明者 曾根田 秀夫  
 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会  
 社日立製作所日立工場内

(72)発明者 中村 光也  
 茨城県日立市幸町3丁目1番1号 株式会  
 社日立製作所日立工場内